УДК 504.054:547 (476)
Кухарчик Т.И., Какарека С.В., Цытик П.В. Полихлорированные бифенилы в электрооборудовании. — Мн.: РУП «Минсктиппроект», 2003. — 28 с.

Брошюра содержит краткую информацию о полихлорированных бифенилах, их свойствах, токсичности, производстве и сферах применения; о типах электрооборудования, заполненного ПХБ, и особенностях его идентификации. Показаны возможные пути решения проблемы ПХБ, а также даны временные рекомендации по обращению с ПХБ-содержащим оборудованием.

Издание подготовлено в связи с проведением инвентаризации ПХБ в Беларуси с целью ознакомления широкого круга специалистов с реальной опасностью ПХБ-содержащего электрооборудования и предупреждения ошибочных решений при обращении с ним.

Табл. 4. Ил. 4. Библиогр. 30.

Рекомендовано к печати Ученым советом Института проблем использования природных ресурсов и экологии НАН Беларуси

© Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды, 2003
© Институт проблем использования природных ресурсов и экологии НАН Беларуси, 2003

Введение

Полихлорированные бифенилы (ПХБ) – группа высокоопасных для человека и окружающей среды соединений, в отношении которых в последние годы предприняты значительные усилия по контролю как на национальном, так и на международном уровне. Их потоки регулируются, в частности, Протоколом по стойким органическим загрязнителям (СОЗ) к Конвенции 1979 года о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния и Стокгольмской конвенцией о СОЗ. ПХБ входят в список двенадцати приоритетных СОЗ, которые, согласно Стокгольмской Конвенции, «должны быть запрещены для использования, производство их должно быть прекращено, а все запасы уничтожены».

Полихлорированные бифенилы, наряду с ДДТ, исторически первыми определены как стойкие органические загрязнители, которые обладают токсическими свойствами, являются стойкими и биологически аккумулируемыми, способными к переносу на большие расстояния в различных средах. Многие из физических и химических свойств, которые сделали ПХБ полезными в промышленности (термостойкость, химическая инертность, высокая упругость паров и др.), также способствовали их широкому распространению в окружающей среде.

Впервые проблема загрязнения природной среды ПХБ была выявлена в конце 1960-х годов. В настоящее время ПХБ фиксируются во всех компонентах природной среды повсеместно, включая фоновые территории. ПХБ накапливаются и в организме человека, в частности, в грудном молоке и жировых тканях.

В период с 1971 по 1980 гг. многие страны предприняли усилия по прекращению производства ПХБ и оборудования, содержащего ПХБ. Однако, несмотря на эти усилия, до 2/3 из 1,3 млн. тонн произведенных ПХБ до сих пор находятся в употреблении или на хранении, представляя угрозу для окружающей среды и здоровья людей.

В Беларуси так же, как и в других странах бывшего СССР, очень мало известно об объемах, номенклатуре и судьбе используемых ПХБ и о поступлении ПХБ в окружающую среду. Согласно предварительным оценкам, на территорию Беларуси в составе электрооборудования было завезено более 1000 т ПХБ. Часть ПХБ-содержащего оборудова-

ния уже выведена из эксплуатации и длительное время хранится на открытых неподготовленных площадках. Имеются многочисленные случаи утечек ПХБ из корродированных корпусов трансформаторов и конденсаторов и их поступления в окружающую среду. Рекогносцировочное обследование показало, что содержание ПХБ в почвах в местах эксплуатации и хранения ПХБ-содержащего оборудования в сотни раз превышает предельно допустимые значения. Это свидетельствует о серьезной опасности накопления ПХБ в биотических компонентах и их поступления в продукты питания.

В настоящее время в Республике Беларусь обсуждаются возможности присоединения к Стокгольмской конвенции по СОЗ. В этой связи необходимо получение объективных данных об объемах использования ПХБ-содержащих материалов и накопленных ПХБ-содержащих отходов. Отсутствие такой информации не только затрудняет подписание Республикой Беларусь международных соглашений по СОЗ, но и осложняет разработку и осуществление мероприятий по ограничению поступления этих соединений в окружающую среду, а также проведение мониторинга этих соединений.

Предлагаемый материал содержит общую информацию о полихлорированных бифенилах, их физических и химических свойствах, торговых названиях ПХБ-содержащих материалов, марках и типах электрооборудования, выпускавшегося в бывшем СССР и других странах, областях использования и возможных объектах нахождения ПХБ и ПХБ-содержащих материалов, влиянии на окружающую среду и здоровье человека.

Свойства ПХБ

Полихлорированные би(ди)фенилы – группа органических соединений, получаемых хлорированием бифенила в присутствии катализатора путем замещения атомов водорода атомами хлора. Общая формула – $C_nH_{n-2-x}Cl_x$. Ароматическая природа и хлорированность – основные причины высокой устойчивости ПХБ. В зависимости от степени замещения возможны 10 гомологов ПХБ (от монохлорбифенилов до декахлорбифенилов) и 209 изомеров ПХБ (табл. 1).

Таблица 1

Физико-химические свойства ПХБ

Соединение	Номер КАС	Формула	Молекулярный вес	Число изомеров
Монохлорбифенилы	27323-18-82	$C_{12}H_9Cl$	189,0	3
Дихлорбифенилы	25512-42-9	$C_{12}H_8Cl_2$	233,1	12
Трихлорбифенилы	25323-68-6	$C_{12}H_7Cl_3$	257,5	24
Тетрахлорбифенилы	26914-33-0	$C_{12}H_6Cl_4$	292	42
Пентахлорбифенилы	25429-29-2	$C_{12}H_5Cl_5$	326	46
Гексахлорбифенилы	26601-64-9	$C_{12}H_4Cl_6$	361	42
Гептахлорбифенилы	28655-71-2	$C_{12}H_3Cl_7$	395,3	24
Октахлорбифенилы	31472-83-0	$C_{12}H_2Cl_8$	430,0	12
Нонахлорбифенилы	53742-83-0	$C_{12}HCl_9$	464,2	3
Декахлорбифенилы	2051-24-3	$C_{12}Cl_{10}$	498,6	1

С ростом содержания хлора меняется агрегатное состояние ПХБ и, соответственно, их свойства, возрастает устойчивость в окружающей среде. При содержании хлора от 19 до 43 % продукты имеют вид кристаллических веществ, при 43-56 % – маслообразных, при 57-69 % – полутвердых и смолообразных и при содержании хлора от 67 до 70 % – вновь кристаллических. ПХБ имеют высокую теплоемкость, низкую электропроводность, инертны по отношению к кислотам и щелочам, обладают хорошей растворимостью в жирах, маслах и органических растворителях, взрывобезопасны.

ПХБ, обладающие более чем 4 атомами хлора (высокохлорированные ПХБ), не горят и не окисляются. Их молекулярная структура близка к молекулярной структуре ДДТ, что во многом определяет общность их поведения в окружающей среде.

ПХБ мало растворимы в воде, при этом растворимость в воде уменьшается с увеличением степени хлорирования (например, растворимость монохлорбифенилов – 5,9 мг/л, а декахлорбифенила – 0,015 мг/л). Летучесть ПХБ также уменьшается с увеличением степени хлорирования. Способность к разложению в значительной степени зависит от структурной характеристики расположения атомов хлора на бифенильных кольцах молекулы ПХБ.

Промышленные ПХБ – бесцветные или имеющие желтоватый оттенок вязкие жидкости с температурой кипения от 325 до 390°С и температурой застывания до минус 30-70°С. Содержание хлора варьирует от 42 до 54 % по массе.

Синтетические жидкости на основе ПХБ – это смесь изомеров, включающая до 50-70 индивидуальных соединений хлорбифенилов и содержащая примеси, в том числе диоксины/фураны: от 1 до 15 мкг/кг ТХДД (2,3,7,8-тетрахлордибензопарадиоксин).

Токсичность

ПХБ обладают низкой токсичностью при однократном воздействии, но высокой кумулятивной способностью при длительном контакте. Основные каналы поступления в организм человека – через кожу, легкие, а также через трофические цепи в загрязненных районах.

Наиболее опасными считаются копланарные изомеры, которые имеют не более одного атома хлора в орто-положении (2,2′ 6,6′). По токсичности они идентичны полихлорированным дибензо-*п*-диоксинам и полихлорированным дибензофуранам. Токсичность ПХБ измеряется по шкале токсичности, сходной со шкалой для диоксинов/фуранов. Эквиваленты токсичности разработаны для 12 конгенеров ПХБ.

Характерная черта поведения ПХБ в окружающей среде – их очень медленное разложение. Имея выраженные липофильные свойства, ПХБ обладают высокой способностью к биоаккумуляции в жиросодержащих компонентах (коэффициент накопления в некоторых биологических объектах достигает десятков миллионов). Выявлены высокие содержания ПХБ в грудном молоке, жировых тканях людей. ПХБ способны проникать через плаценту и концентрироваться в тканях плода.

Уже в 1930-е годы были зарегистрированы случаи отравления ПХБ рабочих, контактировавших с этими соединениями в производственных условиях. В 1963 г. стали известны массовые отравления рабочих на японских предприятиях по производству конденсаторов. Известен пример массового отравления людей ПХБ вследствие нарушения герметичности теплообменной аппаратуры в процессе рафинирования рисового масла. Этот случай, вошедший в историю как *«инцидент Юшо»,* произошел в Японии в 1968 г. Признаками отравления были увеличение и гиперсекреция грудных желез, тошнота, рвота. расширение и порфирия печени, патологические изменения периферийной нервной системы и состава крови, нарушение функции надпочечников.

Из симптомов профессионального отравления, вызываемого ПХБ у рабочих, соприкасающихся с этим продуктом в условиях производственной деятельности, чаще всего отмечаются хлоракне (поражение кожи), а также неврологические явления в виде головных болей, утомляемости, чувства ползания мурашек в конечностях.

Острые токсикозы проявляются в поражении кожи, печени, почек, легких, центральной нервной системы. Попадая в организм, ПХБ хорошо всасываются в желудочно-кишечном тракте, в легких, проникают через кожу и накапливаются в основном в жировой ткани. В большинстве проб жировой ткани содержание ПХБ составляет 1 мг/кг или менее, большие количества – до 700 мг/кг – обнаруживали в образцах жировой ткани людей, подвергавшихся профессиональному воздействию (содержание в крови, соответственно, 0,3 и 200 мкг/100 мл).

ПХБ относятся к иммуно-токсикантам. Их опасность для здоровья человека заключается, прежде всего, в том, что они являются мощными факторами подавления иммунитета ("химический" СПИД). ПХБ обладают выраженным эмбриотоксическим и потенциальным канцерогенным эффектами ($ЛД_{50}$ варьирует от 0,79 до 11 г/кг). Попадая в организм плода и ребенка, ПХБ способствуют развитию врожденного уродства и детской патологии (отставанию в развитии, снижению иммунитета, поражению кроветворения). Кроме того, ПХБ вызывают снижение числа мест имплантации, количества новорожденных и увеличение продолжительности беременности. При длительном введении ПХБ обезьянам-резусам до и во время беременности, а также в период лактации наблюдались ранние выкидыши, преждевременные роды, гибель плодов вскоре после рождения. Однако, самое опасное влияние ПХБ на человека заключается в их мутагенном действии, что негативно сказывается на здоровье последующих поколений людей.

Установлено, что эта группа соединений может вмешиваться в гормональный механизм и вызывать эндокринные поломки, кроме того, ПХБ могут имитировать или блокировать действие тиреоидных гормонов.

Период полувыведения у человека составляет 5 лет.

Считается, что ПХБ являются источником образования диоксинов/фуранов в процессе горения при умеренно высоких температурах (450-950°С).

Нормирование

При разработке санитарно-гигиенических нормативов ПХБ учитывается их способность при разложении образовывать более токсичные соединения, а также высокие кумулятивные качества.

В Беларуси действуют следующие нормативы для ПХБ:

- ориентировочно безопасные уровни воздействия (ОБУВ) трихлордифенила для воздуха населенных пунктов – 0,001 мг/м^3;
- предельно допустимые концентрации (ПДК) ПХБ в воздухе рабочей зоны – 1 мг/м^3;
- ПДК трихлордифенила и пентахлордифенила для вод водоемов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения – 0,001 мг/дм^3.

ПДК для почв не утверждены. При оценках уровня загрязнения почв используют ориентировочно-допустимые концентрации, принятые в России: для ПХБ – 0,06 мг/кг; для трихлордифенила – 0,03 мг/кг; для пентахлордифенила – 0,1 мг/кг.

Гигиенические нормативы ПХБ, применяющиеся в развитых промышленных странах, отличаются как по характеристикам, так и по количественным показателям. В Японии среднесуточная концентрация ПХБ в воздухе рабочей зоны не должна быть выше 0,1 мг/м^3. В странах ЕС максимально допустимое содержание ПХБ в питьевой воде не должно превышать 0,5 мг/дм^3. Максимально допустимое содержание этих соединений в продуктах в США – 0,2-2,0 мг/кг, Швейцарии – 0,5-2,0, Нидерландах – 0,3-1,0, Японии – 0,2-3,0 мг/кг.

Производство ПХБ

ПХБ впервые синтезированы в 1929 г. в США компанией «Монсанто», а в начале 30-х годов начато их промышленное производство во многих странах мира (Германии, Франции, Японии, Англии, Чехословакии, Австрии, Китае, Италии, СССР и других). В глобальном масштабе максимум производства ПХБ был достигнут к 1970 г. Общее мировое производство ПХБ оценивается примерно в 1,3 млн. т, из которых 48 % приходится на США, 13 – на Россию (СССР), 12 % – на Германию.

Препараты ПХБ, используемые в промышленности, известны под различными коммерческими названиями: Арохлор (США), Пирален и Фенохлор (Франция), Аскарель (Англия), Клофен (Германия), Канехлор (Япония), Делор (Чехословакия) и др. Всего насчитывается около 90 торговых наименований ПХБ. В СССР выпускались следующие препараты ПХБ: совол электроизоляционный, совол пластификаторный, совтол-10 и трихлордифенил.

Основными производителями ПХБ на территории бывшего СССР являлись ПО «Оргстекло» (г.Дзержинск) и ПО «Оргсинтез» (г.Новомосковск). Первая очередь по производству совола и совтола-10 введена в эксплуатацию в 1939 г. в Дзержинске. Производство трихлорбифенила начато в 1963 г. По оценкам специалистов, всего в СССР было произведено около 180 тыс. т ПХБ.

Применение ПХБ

Исключительные теплофизические и электроизоляционные характеристики ПХБ, их огнестойкость и взрывобезопасность обеспечили им широкое использование в электротехнической промышленности в виде диэлектрических жидкостей при производстве силовых трансформаторов и конденсаторов. В СССР на долю электротехнической промышленности приходилось около 75 % произведенного ПХБ. В США до 1971 г. для этих целей использовалось 61 % ПХБ, после 1971 г. – 100 %; в Германии – 55,5 % ПХБ, в Японии – 66 %. ПХБ также использовали в качестве теплоносителей в теплообменных системах, охлаждающих жидкостей в горнодобывающем оборудовании, пластификаторов и наполнителей при производстве пластмасс, кабелей, красок, клея, в составе смазочных масел и пестицидов.

Типы синтетических диэлектрических жидкостей

В силовом конденсаторостроении нашли применение в основном пента-, тетра- и трихлордифенилы (табл. 2).

Все другие хлордифенилы имеют относительно высокую температуру застывания и поэтому оказались непригодными для пропитки бумажной и бумажно-пленочной изоляции конденсаторов. Пентахлордифенил (совол), который первым был применен в конденсаторостроении, с середины 70-х годов использовался редко из-за повышенной температуры застывания (6-10°С). Замена пентахлордифенила на трихлордифенил связана также и с экологической опасностью высо-

кохлорированных ПХБ. В трихлордифениле содержание высокохлорированных фракций нормировалось на уровне не выше 0,5-3,5 %.

Для заполнения силовых трансформаторов в СССР в основном применялся совтол-10 – смесь пентахлордифенила (совола электроизоляционного) и трихлорбензола в соотношении компонентов 9:1 частей по массе.

Для конденсаторов, применяемых в северных районах, использовались жидкости, представляющие собой смеси хлорированных дифенилов с трихлорбензолом, трихлорэтилбензолом, гексахлорбутадиеном, хлордифенилоксидом и др. Например, жидкость под условным названием КЖ-50 (конденсаторная жидкость) представляет собой смесь хлордифенилов с хлордифенилоксидом и имеет температуру застывания минус 50°С.

Таблица 2

Характеристика хлорорганических жидких диэлектриков

Название	Состав	Плотность при 20°С, кг/дм^3	Содержание хлора, %
Совол	Пентахлордифенил	1,55	54,6
ТХД	Трихлордифенил	1,4	42
КЖ-50	Полихлордифенилы+ хлордифенилоксид	1,29	н.д.*
Арохлор 1232	Дихлордифенил	1,27-1,28	32
Арохлор 1242	Трихлордифенил	1,38-1,39	42
Арохлор 1248	Тетрахлордифенил	1,405-1,415	48
Арохлор 1254	Пентахлордифенил	1,495-1,505	54
Клофен А-30	Трихлордифенил	1,35	42
Пирален 1460	Полихлордифенилы+ полихлорбензолы	1,41	н.д.
Пирален 1499	Трихлордифенил	1,38	42
Пирален 2000	Дихлордифенил	1,29	32
Пирален 3010	Трихлордифенил	1,38	42
Пирален 5000	Пентахлордифенил	1,55	54
Совтол-10	пентахлордифенил (90 %)+трихлорбензол (10 %)	1,52-1,54	н.д.
Гексол	Пентахлордифенил (20%)+гексахлорбутадиен (80 %)	1,64	н.д.
МГ-55	МГ-45+МГ-50 (тетрахлорэтилбензол+пентахлордифенил)	1,49	н.д.

* - н.д. – нет данных

Среди жидких диэлектриков на основе полиорганосилоксановых соединений выделяется группа полихлор(фтор)органосилоксановых жидкостей – ПХ(Ф)ОСЖ. Последние имеют более узкую область применения (импульсные трансформаторы, специальные конденсаторы, блоки электронной аппаратуры, волноводы, преобразовательные устройства, магнетроны и т.д.). В СССР производилось несколько марок ПХ(Ф)ОСЖ: ФС-5, ХС-2-1, ФС-56 с температурой вспышки от 200 до 340°С и температурой застывания минус 90-100°С.

Жидкие диэлектрики на основе фторорганических соединений представлены фторуглеводородными жидкостями и хлорфторуглеводородными полимерами. Некоторые фторуглеводороды и фторхлоруглеводороды, которые применяются как хладоагенты, получили название фреонов, ряд из которых применяется в качестве диэлектриков. Область их использования ограничивается небольшими трансформаторами, блоками электронного оборудования и другими электрическими аппаратами в тех случаях, когда другие виды жидких диэлектриков не выдерживают высоких рабочих температур.

Типы электрооборудования с ПХБ

Синтетические жидкие диэлектрики применялись в первую очередь в силовых конденсаторах и трансформаторах. Частично они использовались также в производстве специальных конденсаторов, предназначенных для люминесцентных ламп и бытовых электроприборов.

Силовые конденсаторы

Силовые конденсаторы предназначены для продольной компенсации реактивного сопротивления дальних линий электропередач, для повышения коэффициента мощности промышленных электроустановок и индукционных электротермических установок в силовых сетях высокого и низкого напряжения или в силовых устройствах повышенных частот и др. Они могут применяться как отдельными единицами, так и в виде комплектных конденсаторных установок или батарей.

В отличие от конденсаторов, применяемых в радиоэлектронике и связи, силовые конденсаторы отличаются значительным объемом и массой, большой емкостью, реактивной мощностью и запасаемой энергией в конденсаторной единице. В зависимости от назначения выделяются косинусные, импульсные, электротермические, фильтровые, тиристорные и специальные конденсаторы.

Из всего многообразия конденсаторов важно выделить заполненные ПХБ. Согласно техническим условиям и ГОСТам, в обозначении типа конденсатора вторая буква обозначает тип диэлектрика, например, С – пропитка синтетическими жидкостями. Маркировка наиболее распространенных конденсаторов, выпускавшихся в СССР, приведена в таблице 3.

Таблица 3

Марки конденсаторов с ПХБ, выпускавшихся в СССР

Косинусные	Электротермические	Импульсные	Тиристорные
КС0-0,38-12,5-3У3 (3У1)	ЭСВ-0,8-0,5-2У3	ИС 6-200	РСТ-2-2,12У2
КС0-6,3-25-2У3 (2У1)	ЭСВ-1-0,5-2У3	ИС 4-13	РСТ-2-4У2
КС1-0,23-6,5-3У3	ЭСВ-1,6-0,5-2У3	ИС 6-5,5	РСТО-2-6,15У2
КС1-0,38-14-3У1	ЭСВ-2-0,5-2У3	ИС 16-0,8	ФСТ-2,1-160У2
КС1-0,38-18-3У3	ЭСВ-0,8-1-2У3	ИС 20-0,5	ФСТ-4-40У2
КС1-0,38-20-3У1	ЭСВ-1-1-2У3	ДС 7-16	ФСТ-0,75-300У2
КС1-0,38-25-3У3	ЭСВ-1,6-1-2У3		ГСТ-1-50У2
КС1-0,5-18-3У3	ЭСВ-2-1-2У3		
КС1-0,66-20-3У3	ЭСВ-0,5-2,4-2У3		
КС1-0,66-25-3У3	ЭСВ-0,8-2,4-2У3		
КС1-1,05-37,5-2У3	ЭСВП-0,8-2,4-У3		
КС1-10,5-37,5-2У3	ЭСВ-1-2,4-2У3		
КС1-3,15-37,5-2У3	ЭСВП-1-2,4-У3		
КС1-6,3-30-2У1	ЭСВ-1,6-2,4-2У3		
КС1-6,3-37,5-2У1	ЭСВ-2-2,4-2У3		
КС1-6,3-37,5-2У3	ЭСВ-0,5-4-4У3		
КС1-6,3-50-2У3	ЭСВ-0,8-4-2У3		
КС2-0,23-13-3У3	ЭСВП-0,8-4У3		
КС2-0,23-18-3У3	ЭСВ-1-4-2У3		
КС2-0,38-28-3У1	ЭСВП-1-4-2У3		
КС2-0,38-36-3У3	ЭСВ-1,6-4-2У3		
КС2-0,38-40-3У1	ЭСВ-2-4-2У3		
КС2-0,38-50-3У3	ЭСВ-0,5-10-4У3		
КС2-0,5-36-3У3	ЭСВ-0,8-10-2У3		
КС2-0,66-40-3У3	ЭСВП-0,8-10-4У3		
КС2-0,66-50-3У3			
КС2-1,05-75-2У3			
КС2-10,5-100-2У3			
КС2-10,5-75-2У3			
КС2-3,15-75-2У3			
КС2-6,3-100-2У3			
КС2-6,3-60-2У1			
КС2-6,3-75-2У1			
КС2-6,3-75-2У3			
КСК-2-10,5-150-2У3			
КСК-1-10,5-75-2У3			
КСК2-10,5-125-1У1			

Наиболее широкое использование получили косинусные конденсаторы типа КС (КСК), доля которых составляла до 70 % общего выпуска конденсаторов. Среди них выделяются конденсаторы нулевого, первого и второго габаритов (например, КС0 – конденсатор нулевого габарита, весом 18 кг; конденсатор КС1 или КСК1 – первого габарита с весом 26-30 кг; конденсатор типа КС2 или КСК2 – второго габарита с весом 54-60 кг). Размеры металлического корпуса для указанных конденсаторов одинаковы в основании (380x120 мм) и различаются по высоте: соответственно 180, 325 и 640 мм. Все они имеют прямоугольную форму и изготовлены из листовой стали.

Второе место в выпуске конденсаторной продукции занимали электротермические конденсаторы типа ЭСВ. Они имеют только один габарит с высотой корпуса 350 мм (что практически соответствует первому габариту конденсаторов типа КС).

Масса диэлектрика в конденсаторах варьирует в зависимости от его типа и марки и составляет: ПСК - 2,7 кг, ЭСВ – 8,5, КС1, КСК1– 10, ИС – 18, КС2, КСК2 – 19, КСП - 22-24 кг.

Силовые конденсаторы выпускались на Серпуховском (Россия) и Усть-Каменогорском (Казахстан) конденсаторных заводах. Серпуховский завод начал выпуск конденсаторов с ПХБ-наполнителями с 1958-1959 гг. До 1968-1970 гг. в качестве диэлектрической жидкости использовался совол электроизоляционный, затем – трихлордифенил. Кроме того, широко использовались синтетические жидкости типа «Клофен», «Пиралены». С 1959 г. конденсаторы с трихлордифенилом начали производиться на Усть-Каменогорском конденсаторном заводе (с момента пуска в строй). В СССР производство конденсаторов продолжалось вплоть до 1988 г. на Серпуховском конденсаторном заводе и примерно до 1990-1992 гг. – на Усть-Каменогорском. По оценкам специалистов России, на указанных предприятиях было израсходовано около 40 тыс. т ПХБ.

С 1969 г. выпуск конденсаторов осуществлялся также на Ленинаканском электротехническом заводе (Армения). Объемы использованного ПХБ здесь оцениваются в 30 тыс. т, однако типы конденсаторов и сфера их применения не совсем ясна. Известно только, что выпускались преимущественно конденсаторы для светотехнической промышленности и для бытовых кондиционеров. Срок службы таких конденсаторов составляет 10-15 лет. С учетом того, что в 1989 г. конденсаторный завод в Ленинакане (Кумайри) был разрушен во время землетрясения, можно предположить, что основная часть такого оборудования к настоящему времени выведена из эксплуатации.

В СССР поставлялось электрооборудование с ПХБ-наполнителями из Германии (ГДР), Франции, Чехии и др. К настоящему времени выявлено, что из импортного оборудования, применяемого на промышленных предприятиях, известны конденсаторы фирмы ISOCOND (г.Лейпциг) типа LKC, а также типа LA-Z, LOGE, BR и другие (г.Аннаберг), также заполненные ПХБ.

Силовые трансформаторы

Силовые трансформаторы применяются для преобразования электрической энергии в электрических сетях и в установках, предназначенных для приема и использования электрической энергии.

В перечне основных типов трансформаторов с ПХБ наиболее часто упоминаются ТНЗ и ТНЗП производства Чирчикского трансформаторного завода (Узбекистан). Выпуск трансформаторов с совтолом начат примерно в 1939-1940 гг. и продолжался до 1987-1990 гг., т.е. около 50 лет. Около 98% совтола-10 (56 тыс. т), произведенного в России, использовано на Чирчикском трансформаторном заводе. Среди электрооборудования, выпускавшегося на ПО «Уралэлектротяжмаш» (Россия), с совтолом-10 производились трансформаторы типов ТНПУ, ТНП, ТНРУ и ТНЗПУ; их производство прекращено в 1974 г.

Масса совтола в трансформаторах зависит от их размера (и мощности) и варьирует от 0,160 т до 4,4 т (табл. 4).

Таблица 4

Марки трансформаторов с совтолом, выпускавшихся в СССР

Марка	Содержание совтола, кг
ТНЗ-25/10	160
ТНЗ-40/10	205
ТНЗ-630/10	1000
ТНЗП-630/10	1000
ТНЗ-1000/10	1676
ТНЗП-1000/10	1786
ТНЗПУ-1000/10	2210
ТНЗ-1600/10	2765
ТНЗП-1600/10	2850
ТНЗ-2500/10	2980
ТНЗ-2500/10	4120
ТНЗ-2500/10	4440
ТНП-800/10	2550
ТНП-800/10	2750
ТНП-1600/10	3300

Характер диэлектрика в трансформаторе можно также отчасти определить по его маркировке. Наличие буквы «Н» указывает на негорючий диэлектрик, а это в большинстве случаев, по крайней мере в старых трансформаторах – ПХБ.

Сферы применения ПХБ-содержащего электрооборудования

Основными пользователями конденсаторов и трансформаторов являются следующие отрасли:

электрические подстанции распределительной энергетической сети;
предприятия металлургии и машиностроения;
горнодобывающая промышленность;
предприятия промышленности строительных материалов;
нефтепереработка и химическая промышленность;
лесная и деревообрабатывающая промышленность;
легкая и пищевая промышленность;
тяговые подстанции железнодорожного транспорта.

Тест на определение наличия ПХБ в электрооборудовании

В ряде случаев идентификация диэлектрика, залитого в конденсаторы и трансформаторы, затруднена (в связи с отсутствием торгового знака или маркировки оборудования). В этом случае Программа ООН по окружающей среде (UNEP) рекомендует проведение простых тестов, позволяющих определить тип диэлектрика. Тесты основаны на использовании знаний основных свойств ПХБ (например, плотности) и могут быть использованы как предварительная идентификация жидкости, свидетельствующая о присутствии ПХБ, но не позволяющая определить их концентрацию.

Тест на плотность: этот тест позволяет сравнить плотность диэлектрической жидкости с водой. Как известно, синтетические диэлектрические жидкости на основе ПХБ имеют плотность примерно 1,5, тогда как минеральные масла – около 1 или меньше. Если диэлектрик опустится на дно – это ПХБ, если будет плавать на поверхности воды – минеральное масло.

Тест на присутствие хлора: этот тест указывает на присутствие хлора в диэлектрике и, соответственно, на наличие ПХБ. Основан на

изменении цвета пламени при сгорании вещества на медной проволоке в газовой горелке. В случае присутствия ПХБ цвет пламени (при нагревании проволоки) становится зеленым.

Поступление ПХБ в окружающую среду

В процессе эксплуатации конденсаторов поступление ПХБ в окружающую среду практически исключено. Срок службы конденсаторов составляет 20-25 лет. Замена диэлектриков в конденсаторах не производится; срок службы жидкостей совпадает со сроком службы оборудования. Для трансформаторов предусмотрена замена охлаждающей жидкости, однако на практике проводится регулярная замена только трансформаторного масла. В соответствии с дополнениями от 01.06.86г. к ГОСТ 16555-75, трансформаторы с совтолом должны эксплуатироваться без капитального ремонта (соответственно, и без замены жидкости). Для работы с синтетическими хлорсодержащими жидкостями необходимы специально оборудованные площадки, емкости и другие приспособления. Поэтому чаще всего при “старении” жидкости типа «совтол-10» трансформатор выводится из эксплуатации (по крайней мере, такая ситуация характерна для Беларуси).

ПХБ поступают в окружающую среду в результате непосредственных утечек из поврежденного электрооборудования. Основными причинами повреждения конденсаторов являются пробои (иногда с разгерметизацией металлического корпуса), физический износ оборудования, коррозия корпуса. Вероятность повреждения корпуса снижается от бумажных конденсаторов (типа КС) к бумажно-пленочным (типа КСК) и далее к пленочным: у первых разложение бумаги электрической дугой сопровождается мощным газовыделением, вспучиванием и повреждением корпуса часто с воспламенением (бумага является фитилем, подпитывающим место горения).

Надежность и срок службы конденсаторов, пропитанных пентахлордифенилом, резко снижается в зимнее время. При этом наибольшее количество конденсаторов выходит из строя в момент их включения после длительного перерыва в работе. Выход конденсаторов из строя объясняется тем, что при низких температурах вследствие неравномерности охлаждения в диэлектрике создается разрежение и образуются пустоты, в которых при повторном включении охлажденного конденсатора возникают частичные разряды, приводящие к его пробою. Кроме того, после повторного включения конденсаторов в работу вследствие неравномерного разогрева в диэлектрике создаются механические напряжения, которые могут приводить к образованию трещин и разрыву бумажных листов и в конечном итоге к пробою диэлектрика.

При «взрыве» конденсатора нарушение корпуса происходит не всегда. В ряде случаев отмечается простое вздутие; непосредственных утечек при этом не происходит, испарение возможно.

При нарушении целостности корпуса конденсатора и образовании трещин в нижней части корпуса практически вся свободная жидкость вытекает. В случае разгерметизации корпуса в верхней части утечки обусловлены чаще всего несоблюдением условий по демонтажу поврежденного оборудования и его хранения.

Наиболее интенсивный выход из строя конденсаторов отмечается при несоблюдении условий их установки и обслуживания, например: установка на открытых площадках конденсаторов, предназначенных для работы в закрытых помещениях; несвоевременная покраска корпуса.

В настоящее время в Беларуси значительная часть конденсаторов не используется, поскольку в связи с общим спадом промышленного производства снизились и расходы электроэнергии, повысилась реактивная мощность в электросетях. Ряд конденсаторных батарей отключен уже более 10 лет назад, соответственно прекращено их обслуживание. При такой ситуации возрастает опасность быстрого разрушения металлических корпусов и утечек жидкости (фото 1 и 2).



Фото 1. Общий вид конденсаторной установки, выведенной из эксплуатации



Фото 2. Коррозия корпусов конденсаторов КС1 после отключения установки

Обследование ряда электроподстанций, а также тяговых подстанций и промышленных предприятий Беларуси показало, что утечки жидкости происходят по следующим причинам: при взрыве конденсаторов с разрушением корпуса; при коррозии корпуса конденсаторов и трансформаторов; при демонтаже электрооборудования; при хранении резервного, поврежденного и демонтированного оборудования на открытых площадках; при умышленной разгерметизации оборудования.

В настоящее время отсутствуют специально подготовленные хранилища для ПХБ-содержащего оборудования, в большинстве случаев не ведется контроль за соблюдением экологически безопасного обращения с ним. На фотографиях 3 и 4 показаны примеры временного хранения поврежденных и выведенных из эксплуатации конденсаторов.



Фото 3. Хранение поврежденных конденсаторов КС2 на открытой площадке (на земле)



Фото 4. Хранение выведенных из эксплуатации конденсаторов КС2 на открытой площадке (на бетонных плитах)

Оценка объемов ПХБ

Оценка объемов ПХБ, находящихся в эксплуатации либо накопленных в виде отходов, – один из важнейших элементов контроля и управления. По оценкам международных экспертов, около 90% ПХБ поступает в окружающую среду вследствие утечек из электрооборудования. Поэтому особое внимание во многих странах мира уделяется учету электрооборудования, заполненного ПХБ. Возможны два основных варианта оценки объемов ПХБ: 1) на основе баланса производства-потребления ПХБ; 2) на основе результатов инвентаризации электрооборудования.

Опыт России и Украины в проведении инвентаризации ПХБ, выборочное обследование ряда предприятий Беларуси показал, что проведение полной инвентаризации электрооборудования осложняется многими причинами. Одна из них – трудоемкость данного процесса в связи с многочисленностью сфер использования электрооборудования. Другая причина – отсутствие первичного учета электрооборудования на промышленных предприятиях, прежде всего, конденсаторов, которые не относятся к основным фондам.

В странах СНГ такие работы по инвентаризации начали проводить сравнительно недавно. Так, в 1995-1996 гг. Госкомэкологии России проведена первая инвентаризация ПХБ-содержащего электрооборудования, в 1999-2000 гг. – вторая. Общее количество ПХБ в электрооборудовании на территории России оценивается в 27 тыс.т. Начаты аналогичные работы в Украине и Эстонии. На 2003-2004 гг. запланировано проведение инвентаризации ПХБ и в Беларуси.

Помимо классической инвентаризации оборудования по предприятиям («снизу-вверх») возможна оценка объемов ПХБ «сверху-вниз»: на основании баланса производства ПХБ-содержащих жидкостей и оборудования с ПХБ.

На данном этапе для оценки объемов ПХБ в электрооборудовании нами применен метод экспертной оценки с учетом объемов произведенных жидкостей и их использования на электротехнических заводах.

Оценка объемов ПХБ в конденсаторах

Всего в бывшем СССР при производстве конденсаторов за 1959-1990 гг. использовано около 90 тыс.т ПХБ, из которых значительная часть оказалась в окружающей среде в процессе заливки в конденсаторы (примерно 10% от использованного количества ПХБ). Поскольку срок службы конденсаторов составляет 20-25 лет, то значительная часть электрооборудования устарела и выведена из эксплуатации. Например, по данным выборочного обследования электрооборудования на предприятиях Беларуси и Украины, в настоящее время используются или находятся на хранении конденсаторы, выпущенные после 1972-1975 гг. (отмечаются редкие случаи наличия конденсаторов 1968-1970 гг.), т.е. конденсаторы, произведенные в 1959-1971 гг., в

большинстве случаев “утеряны”. Это означает, что примерно 38% общего объема ПХБ, или около 30-31 тыс.т уже рассеялось в окружающей среде.

На территории стран бывшего СССР, по нашим оценкам, должно находиться примерно 50 тыс. т ПХБ в конденсаторах (эксплуатируемых, резервных, поврежденных), из которых около 34 тыс. т приходится на долю Европейской части, на долю Беларуси – около 500 т.

Оценка объемов ПХБ в трансформаторах

Всего в СССР при производстве трансформаторов было использовано 57 тыс. т совтола-10. Трансформаторы с совтолом используются уже около 60 лет, средний срок их службы оценивается в 40 лет. До 1960 г. произведено и, соответственно, использовано в трансформаторах примерно 13 тыс.т совтола-10. Вероятно, это количество к настоящему времени рассеялось; в трансформаторах могло сохраниться примерно 44 тыс.т совтола. На долю Европейской части бывшего СССР приходится примерно 31 тыс.т., на долю Беларуси – около 500 т.

О возможных путях решения проблемы ПХБ

Опасность накопления ПХБ в живых организмах, угроза гибели популяций и целых экосистем, угроза здоровью и жизни человека, потенциальная возможность утечек и выбросов ПХБ из действующих установок, хранилищ ПХБ-содержащих отходов переводит вопрос о загрязнении окружающей среды этими соединениями в разряд глобальных экологических проблем.

Учитывая столь серьёзный уровень экологической опасности ПХБ уже в 70-х годах в Японии, США, Канаде, многих европейских странах были разработаны меры, регламентирующие производство, эксплуатацию, переработку и уничтожение ПХБ. В число этих мер входят следующие:

полный запрет на производство ПХБ;

постепенная замена ПХБ альтернативными материалами с менее токсичными свойствами;

контроль за материалами, содержащими ПХБ при их эксплуатации, складировании, транспортировке и размещении;

разработка эффективных экологически безопасных технологий переработки и обезвреживания ПХБ-содержащих материалов, контроль за процессами обезвреживания и переработки отходов;

разработка новых правил эксплуатации установок, в которых используются ПХБ, с учётом более жёстких требований к экологической безопасности производств.

Возможность постепенного вывода ПХБ-содержащих материалов из сферы хозяйственной деятельности человека и повсеместного запрета их производства зависит от решения проблемы замены ПХБ новыми материалами с близкими эксплуатационными характеристиками, но обладающими существенно меньшей токсичностью. Наиболее остро стоит вопрос о поиске заменителей для диэлектрических материалов на основе ПХБ.

За последние годы получены и испытаны новые композиции и отдельные соединения, которые рекомендовано использовать в качестве заменителей ПХБ в трансформаторах и конденсаторах. Например, минеральные и силиконовые масла, высокомолекулярные парафины, алкилированные бифенилы и трифенилы, эфиры фосфорной, фталевой и других карбоновых кислот, сложные эфиры многоатомных спиртов. Эти вещества при меньшей токсичности приближаются к ПХБ по своим диэлектрическим свойствам, но уступают им по химической инертности и стойкости к горению.

В системе мер, направленных на снижение степени загрязнения окружающей среды, определённое место занимает консервация выведенных из сферы хозяйственной деятельности ПХБ в отстойниках или местах захоронения. Наиболее безопасным является метод остекловывания, хотя при остекловывании возможно образование токсичных диоксинов/фуранов и их последующая диффузия вместе с ПХБ в окружающую среду. Метод отверждения широко используется при захоронении ПХБ, однако он не может гарантировать их полную изоляцию от окружающей среды.

Хранение неразложившихся ПХБ в отстойниках – менее надёжный метод их консервации. Неизбежность диффузии ПХБ из отстойников усугубляется вероятностью возникновения аварийных ситуаций в местах хранения.

Наиболее перспективным способом снижения количества ПХБ в окружающей среде является их переработка в экологически безопасные продукты. Можно выделить следующие способы переработки ПХБ:

щелочное дехлорирование (для регенерации загрязненного трансформаторного масла);

высокотемпературное сжигание (1200 °С);

плазмохимическая переработка;

фотохимическое окисление жестким ультрафиолетовым излучением в присутствии озона и пероксида водорода.

Эти методы могут включать операции концентрирования ПХБ перед обработкой. К таким операциям относятся экстракция, адсорбция, диализ, выпаривание, дистилляция, фильтрация. Особое значение подобные операции приобретают при необходимости очистки трансформаторов и конденсаторов от остатков ПХБ. За последние годы благодаря применению экстракции жидкостями при критических температуре и давлении значительно повысилась эффективность извлечения ПХБ из агрегатов, подлежащих очистке.

В целом выбор методов утилизации ПХБ, ПХБ-содержащего оборудования, отходов зависит от агрегатного состояния отходов и концентрации в них ПХБ. Это может быть ПХБ в чистом виде (слитые жидкости), загрязненные трансформаторные масла (после смены диэлектрика), загрязненные грунты, ветошь, бумага, опилки и прочие материалы, оборудование (контейнеры, трансформаторные баки, собственно конденсаторные банки).

Временные рекомендации по обращению с ПХБ-содержащим оборудованием

Первые результаты изучения ПХБ и ПХБ-содержащего оборудования в Беларуси показали, что как и во многих странах бывшего СССР, проблемы обращения с ПХБ-содержащим оборудованием и отходами обусловлены рядом причин:

не налажен учет ПХБ-содержащего оборудования;

отсутствуют инструкции и правила обращения с ним;

отсутствуют специально подготовленные хранилища для поврежденного оборудования;

не ведется контроль за соблюдением экологически безопасного обращения с ним.

В связи с длительным сроком эксплуатации конденсаторов и трансформаторов (от 20 лет и более) на многих предприятиях утеряна техническая документация на такое оборудование, произошла смена обслуживающего персонала. В большинстве случаев нет специальных указателей (ярлыков) на содержание ПХБ в оборудовании. Во многих случаях обслуживающий персонал не знает о специфике ПХБ-содержащего оборудования и правилах безопасности при работе с ним.

Нет инструкций (правил) по обращению с поврежденным оборудованием, имеющим утечки жидкости. Отсутствуют специально подготовленные хранилища, емкости. Не предпринимаются меры по предотвращению утечек.

В период становления и интенсивного развития электротехнической промышленности в СССР, использующей синтетические диэлектрики на основе ПХБ, предполагалось (и об этом имеется запись в технической документации на конденсаторы производства 70-х годов), что конденсаторы с ПХБ, отслужившие срок службы и поврежденные в процессе эксплуатации, подлежат утилизации на заводе-изготовителе (по договору). Однако в силу ряда причин технология утилизации не была разработана так же, как не была продумана система сбора, хранения и транспортировки такого оборудования от многочисленных потребителей на завод.

В настоящее время в Беларуси во многих случаях конденсаторные батареи отключены, в ряде случаев они демонтированы. Наиболее широко практикуемая система хранения – на открытых площадках (на бетонных плитах, либо просто на земле). В условиях непосредственного контакта с грунтом происходит быстрое разрушение нижней части металлического корпуса конденсатора, сопровождающееся утечками ПХБ. Кроме того, коррозии корпуса способствуют атмосферные осадки и другие факторы внешней среды. Бетонные плиты, используемые для хранения конденсаторов или трансформаторов, в некоторой степени замедляют разрушение корпуса. Однако и в этом случае утечки диэлектрика неизбежны, при этом пропитывается бетон, а по стыкам бетонных плит ПХБ поступает в почву.

По результатам выборочного обследования установлено, что во всех случаях в местах эксплуатации и хранения ПХБ-содержащего электрооборудования почвы загрязнены до опасных уровней, в сотни раз превышающих предельно допустимые концентрации для почв.

Существующие многочисленные утечки ПХБ из корродированного оборудования создают реальную угрозу дальнейшему распространению ПХБ в компонентах окружающей среды. С течением времени, если не принять необходимые меры, интенсивность коррозии и

разрушения корпусов конденсаторов и трансформаторов будет повышаться. И уже в течение ближайших нескольких лет может сложиться критическая ситуация, когда утечки станут массовыми. Учитывая высокую опасность ПХБ для живых организмов и людей необходимо срочно принять меры по предотвращению дальнейшего распространения ПХБ в окружающей среде. Для этого рекомендуется:

- слить остатки ПХБ из поврежденных трансформаторов в герметичные металлические емкости. Для этого необходимо выбрать или изготовить (с соответствующим обоснованием) пригодные для хранения ПХБ металлические емкости с учетом их химической устойчивости и совместимости;
- упаковать поврежденные конденсаторы, а также конденсаторы с признаками утечек жидкости в герметичные металлические контейнеры. Сливать ПХБ из них нецелесообразно, поскольку доля свободной жидкости в конденсаторах составляет 50-60% (по оценкам специалистов завода-изготовителя), остальная жидкость содержится в обмотке. Слив ПХБ из трансформаторов и переупаковку конденсаторов должны осуществлять специализированные подразделения Министерства по чрезвычайным ситуациям;
- хранить неповрежденные трансформаторы и конденсаторы до разработки планов действий по их утилизации в закрытых специальных помещениях. В случае необходимости предусмотреть оперативное строительство временных хранилищ с целью их защиты от непосредственного контакта с атмосферными осадками;
- составить перечень и обозначить на местности специальными указателями бывшие площадки эксплуатации и хранения ПХБ-содержащих конденсаторов и трансформаторов, поскольку в процессе эксплуатации (хранения) могли иметь место аварийные утечки.

В последующем необходимо проведение детального эколого-геохимического обследования площадок эксплуатации и хранения оборудования с ПХБ, включая анализ загрязненности почв и грунтовых вод, оценку объемов загрязненного грунта. На основании результатов обследования должны быть разработаны мероприятия по утилизации наиболее загрязненного грунта и бетонных плит, а также рекомендации по эколого-безопасному использованию загрязненных и прилегающих территорий.

Использованная литература

1. Варшавский Д.С. Силовые конденсаторы // Итоги науки и техники. Сер. Электротехнические материалы, электр. конденсаторы, пров. и каб. Т.16. М.: ВИНИТИ. 1991. 144 с.
2. Гапонюк Э.И., Бобовникова Ц.И. Содержание полихлорбифенилов (ПХБ) в объектах природной среды и их биологическое значение // Загрязнение почв и сопредельных сред. М.: Гидрометеоиздат, 1988. С.36-46.
3. ГОСТ 15957-70.Трансформаторы (и автотрансформаторы) трехфазные силовые масляные общего назначения класса напряжения 220 кВ.
4. ГОСТ 17545-72.Трансформаторы (и автотрансформаторы) силовые масляные общего назначения класса напряжения 330 кВ.
5. ГОСТ 16555-75.Трансформаторы силовые трехфазные герметичные масляные и с негорючим жидким диэлектриком.
6. ГОСТ 11677-85.Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
7. ГОСТ 16110-80.Трансформаторы силовые. Термины и определения.
8. Гулевич А. И., Киреев А. П. Производство силовых конденсаторов. Изд. 4-е перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1981.
9. Гулевич А. И., Киреев А. П. Производство силовых конденсаторов. Учеб. пособие для подготовки рабочих на производстве. Изд. 3-е, перераб. и доп. М., Высшая школа, 1975. 365 с.
10. Загрязнение Арктики: Доклад о состоянии окружающей среды Арктики / АМАП. Программа арктического мониторинга и оценки. СПб., 1998.- 260 с.
11. Занавескин Л. Н., Аверьянов В. А. Полихлорбифенилы: проблемы загрязнения окружающей среды и технологические методы обезвреживания // Успехи химии, 1998. Т. 68, № 8. С. 788-800.
12. Информационно-методические материалы по проблеме предотвращения загрязнения окружающей среды полихлорди(би)фенилами. Екатеринбург, 1997.- 23с.
13. Какарека С. В., Кухарчик Т. И. Идентификация источников и оценка выделения полихлорированных бифенилов в окружающую среду // Природопользование и охрана окружающей среды. Минск, 2000. С. 18.
14. Какарека С.В., Кухарчик Т.И., Хомич В.С. Стойкие органические загрязнители: источники и оценка выбросов. Мн.: РУП «Минсктиппроект», 2003. 220 с.
15. Полихлорированные бифенилы и терфенилы: Гигиенические критерии состояния окружающей среды. 2: Пер. с англ. Женева-Москва: ВОЗ-Медицина, 1980. 98с.
16. Полихлорированные дибензо-пара-диоксины и дибензофураны: Гигиенические критерии состояния окружающей среды. 88. ВОЗ, Женева, 1993.

17. Протокол по стойким органическим загрязнителям к Конвенции 1979 года о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния и решение 1998/2 исполнительного органа о подлежащей представлению информации и процедуре добавления веществ в Приложения I, II или III к Протоколу по стойким органическим загрязнителям / Организация объединенных наций, 1998. 193 с.
18. Силовые электрические конденсаторы. М.: Энергия, 1975. 248 с.
19. Справочник по электротехническим материалам. В 3 т. / Под ред. Ю. В. Корицкого и др., Т. 1. Изд. 2-е, перераб. М.: Энергия, 1974.
20. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. / Под ред. Ю. В. Корицкого и др. Т. 1. Изд. 3-е, перераб. М.: Энергоатомиздат, 1986.
21. Сурнина Н. Н., Бобовникова Ц. И. Оценка загрязнения воздушного бассейна полихлорированными бифенилами в районе конденсаторного завода // Труды ИЭМ. Вып. 17 (145). М: Моск. отд. Гидромеоиздата. 1990. С. 28-31.
22. Шахнович М. И. Синтетические жидкости для электрических аппаратов. М.: Энергия, 1972.
23. Янин Е. П. Полихлорированные бифенилы в окружающей среде. М.: Диалог-МГУ, 1997. – 35с.
24. Янин Е. П. Электротехническая промышленность и окружающая среда (эколого-геохимические аспекты). М.: ИМГРЭ, 1998.
25. Breivik K., Sweetman A., Pacyna J. M., Jones K. Towards a Global Historical Emission Inventory for Selected PCB Congeners – a Mass Balance Approach. 1. Global Production and Consumption // The Science of the Total Environment, 2002. Vol. 290. P. 181-198.
26. Breivik K., Sweetman A., Pacyna J. M., Jones K. Towards a Global Historical Emission Inventory for Selected PCB Congeners – a Mass Balance Approach. 2. Emissions. The Science of the Total Environment, 2002. Vol. 290. P. 199-224.
27. Guidelines for the Identification of PCBs and Materials Containing PCBs / First Issue. Prepared by UNEP Chemicals. United Nations, UNEP, August 1999.
28. Locating and Estimating Air Emissions from Sources of Polychlorinated Biphenyls (PCB). US EPA-450/4-84-007n. May, 1987.
29. PCB in the Russian Federation: Inventory and Proposals for Priority Remedial Actions. AMAP Report. ISBN 82-7971-008-6. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo. Published by: Centre For International Projects (CIP), Moscow. 2000.
30. WHO. Environmental Health Criteria 140: Polychlorinated Biphenyls and Terphenyls (second edition), Geneva, World Health Organization. 1993.

Содержание